

**MARINHA DO BRASIL
DIRETORIA DE ENSINO DA MARINHA
CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE ALEXANDRINO**

**CURSO DE APERFEIÇOAMENTO AVANÇADO EM
PROPULSÃO NAVAL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**PROPULSÃO AZIMUTAL: ANÁLISE COMPARATIVA EM RELAÇÃO À
PROPULSÃO CONVENCIONAL COM LINHAS DE EIXO**



1ºTEN BRENNO DE CARVALHO MARINS

Rio de Janeiro
2023

1ºTEN BRENNO DE CARVALHO MARINS

PROPULSÃO AZIMUTAL: ANÁLISE COMPARATIVA EM RELAÇÃO À PROPULSÃO
CONVENCIONAL COM LINHAS DE EIXO

Monografia apresentada ao Centro de Instrução Almirante Alexandrino como requisito parcial à conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Propulsão Naval.

Orientadores:

Alexandre Teixeira de Pinho Alho, DSc.

CC (EN) Yuri de Souza Duarte, MSc.

CIAA
Rio de Janeiro
2023

1ºTEN BRENNO DE CARVALHO MARINS

PROPULSÃO AZIMUTAL: ANÁLISE COMPARATIVA EM RELAÇÃO À PROPULSÃO
CONVENCIONAL COM LINHAS DE EIXO

Monografia apresentada ao Centro de Instrução Almirante Alexandrino como requisito parcial
à conclusão do Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Propulsão Naval.

Aprovada em _____

Banca Examinadora:

Alexandre Teixeira de Pinho Alho, DSc. – UFRJ _____

CC (EN) Yuri de Souza Duarte, MSc. – DEN _____

CC (RM1-EN) Carlos Alfredo Órfão Martins, MSc. – CIAA _____

Dedico este trabalho à memória da minha mãe
Eliane que muito me apoiou em todos os
momentos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por me permitir concluir mais essa etapa da minha vida e da carreira que escolhi.

Aos meus pais, pelo apoio irrestrito durante toda minha vida até então.

A minha companheira Lídia, que sempre esteve presente comigo nos momentos bons e ruins.

Aos Srs. Alexandre Alho e CC (EN) Yuri, que me orientaram neste trabalho de conclusão de curso de maneira excepcional.

Ao CC (RM1-EN) Carlos Martins, que esteve à frente do Curso de Propulsão Naval como um líder, sempre nos motivando e nunca medindo esforços para que todos pudessem superar as dificuldades impostas pela vida acadêmica e obter êxito ao final do curso.

Ao Grêmio de Vela do Colégio e da Escola Naval, que me proporcionaram experiências únicas no mar, que contribuíram de sobremaneira para a minha formação marinheira e escolhas que fiz, e que perdurarão por toda minha carreira.

Aos meus companheiros de turma, que sempre estiveram ao meu lado desde a minha chegada ao Colégio Naval até os dias de hoje.

E a todos os Oficiais, Praças, professores, instrutores e servidores civis que contribuíram de alguma maneira para a minha formação, me levando a concluir com louvor mais este ciclo.

“Quanto mais aumenta nosso conhecimento, mais evidente fica nossa ignorância”.

John F. Kennedy

PROPULSÃO AZIMUTAL: ANÁLISE COMPARATIVA EM RELAÇÃO À PROPULSÃO CONVENCIONAL COM LINHAS DE EIXO

Resumo

Neste estudo, é realizada uma análise comparativa entre os sistemas de propulsão azimutal e os sistemas convencionais com linhas de eixo. São descritos os sistemas convencionais por linhas de eixo e os sistemas azimutais, bem como seus princípios de funcionamento e particularidades. Então, é realizada uma análise comparativa qualitativa entre os dois sistemas, visando uma maior compreensão do assunto e auxiliar uma possível tomada de decisão entre qual escolher.

Palavras-chave: Propulsão Azimutal, Propulsão Convencional, Sistemas de Propulsão.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Réplica da hélice desenvolvida por Brunel em 1845	11
Figura 1.2 – Sistema de propulsão por linha de eixo moderno	12
Figura 1.3 – Leme de Pleuger	13
Figura 1.4 – Primeira unidade Azipod® instalada em um navio	14
Figura 4.1 – Diagrama de linha de eixo	19
Figura 4.2 – Função do Mancal de Escora	20
Figura 4.3 – Mancal de Escora.....	21
Figura 4.4 – Mancal de Apoio.....	21
Figura 4.5 – Tubo telescópico lubrificado por óleo.....	22
Figura 4.6 – Sessão de linha de eixo.....	23
Figura 4.7 – Hélice de passo fixo.....	24
Figura 4.8 – Hélice de passo controlável.....	25
Figura 4.9 – Empuxo unidirecional.....	25
Figura 4.10 – Empuxo multidirecional.....	25
Figura 4.11 – Interferência entre propulsores azimutais.....	27
Figura 4.12 – Arranjo em Z.....	28
Figura 4.13 – Arranjo em L.....	28
Figura 4.14 – Instalação rebatível no convés.....	29
Figura 4.15 – Instalação retrátil.....	29
Figura 4.16 – Visão interna de um “Mermaid” POD® Rolls Royce.....	29
Figura 4.17 – <i>Azipull</i> e <i>Azipush</i>	30
Figura 4.18 – Propulsor Azipull®	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Características importantes dos tipos de hélice.....	25
Tabela 5.1 – Tabela comparativa.....	34

LISTAS DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
RMB	Revista Marítima Brasileira
CCM	Centro de Controle das Máquinas
MCP	Motor de Combustão Principal
MCA	Motor de Combustão Auxiliar
MEP	Motor Elétrico Principal
DP	<i>Dynamic Positioning</i> (Posicionamento Dinâmico)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Apresentação do Problema	15
1.2 Justificativa e Relevância	15
1.3 Objetivos	15
1.3.1 Objetivo Geral	16
1.3.2 Objetivos Específicos	16
2 REFERENCIAL TEÓRICO	17
3 METODOLOGIA	18
3.1 Limitações do Método	18
4 DESCRIÇÃO E ANÁLISE DO CASO	19
4.1 Propulsão Convencional por Linhas de Eixo	19
4.1.1 Mancal de Escora.....	20
4.1.2 Mancal de Apoio.....	21
4.1.3 Tubo Telescópico.....	22
4.1.4 Linha de Eixo.....	22
4.1.5 Hélice.....	23
4.2 Propulsão Azimutal	26
4.2.1 Propulsor Azimutal.....	27
4.2.1 Propulsor tipo <i>Pod</i>	29
4.3 Análise Comparativa entre a Propulsão Convencional e a Propulsão Azimutal	31
4.3.1 Propulsão convencional com linhas de eixo.....	31
4.3.2 Propulsão Azimutal.....	32
5 CONCLUSÃO	33
5.1 Considerações Finais	35
5.2 Sugestões para futuros trabalhos	35
REFERÊNCIAS	37

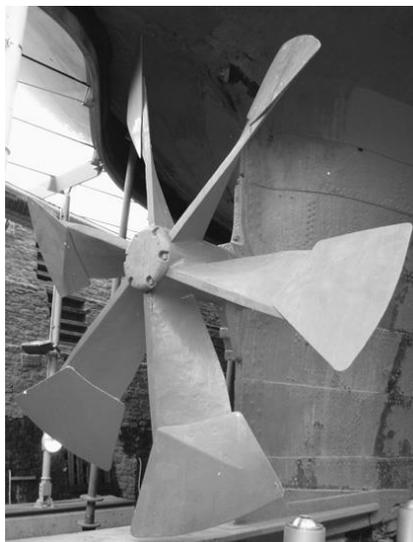
1 INTRODUÇÃO

A propulsão de embarcações representa um tema de grande interesse de pesquisa e desenvolvimento da engenharia naval, possibilitando que as embarcações possam se mover de forma eficiente e eficaz através da água. Uma das principais disciplinas no projeto de embarcações é o sistema de propulsão, que fornece a potência necessária para impulsionar o navio para frente. Neste trabalho, exploraremos dois tipos de sistemas de propulsão de navios: a propulsão de linha de eixo e a propulsão azimutal.

A propulsão por linhas de eixo é uma tecnologia fundamental na história da engenharia naval e desempenhou um papel crucial na evolução das embarcações. Ela envolve o uso de eixos mecânicos para transmitir o movimento de uma fonte de energia, como um motor, para as hélices que impulsionam o navio. A história dessa forma de propulsão remonta à segunda metade do século XIX, quando, até então, as embarcações utilizavam a força humana ou o vento para se locomover.

Conforme o avanço da tecnologia, as embarcações equipadas com propulsão mecânica passaram a ser equipadas com eixos e hélices, substituindo as rodas de pás laterais. As primeiras hélices surgiram baseadas no princípio do Parafuso de Arquimedes, que era capaz de deslocar um fluido de uma região mais baixa para outra mais elevada, sendo então aprimoradas a cada nova experiência, chegando a uma forma bem próxima do que temos hoje já em 1845, utilizando-se o conceito de lâminas equidistantes e levemente anguladas, formando o passo (figura 1.1). Esse desenvolvimento tornou os navios mais eficientes e permitiu uma navegação mais segura em termos propulsivos e, conseqüentemente, uma maior regularidade na programação das rotas comerciais marítimas.

Figura 1.1 – Réplica da hélice desenvolvida por Brunel em 1845.



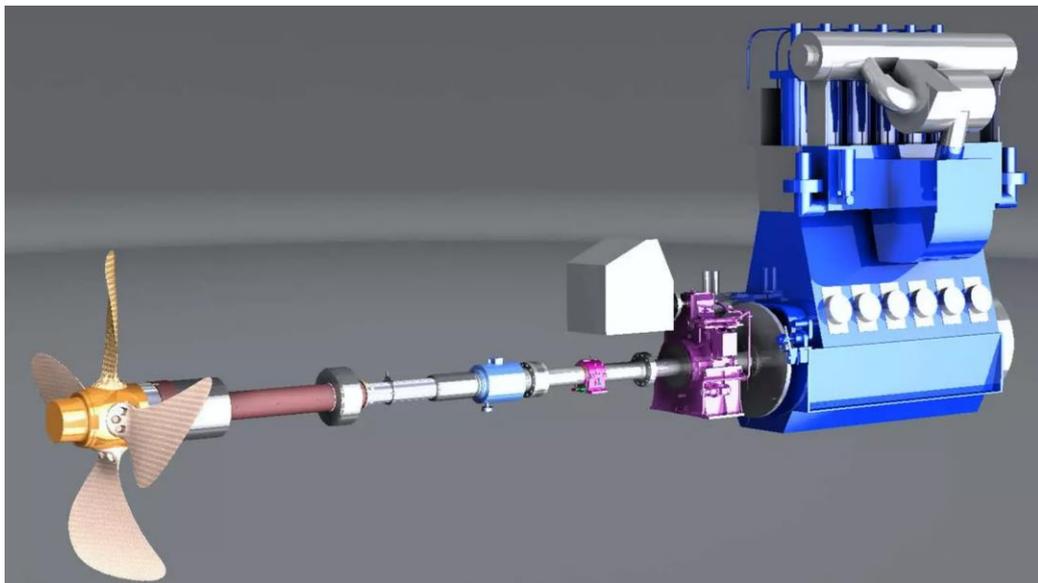
Fonte: Carlton (2007, p.7)

O final do século XIX viu a transição gradual para motores de combustão interna, que passaram a substituir as caldeiras na propulsão por linhas de eixo. Os motores a diesel e a gasolina se tornaram cada vez mais populares para impulsionar navios de diferentes tamanhos, oferecendo maior eficiência e autonomia, visto que transportar grandes quantidades de carvão era muito difícil e limitava a distância que os navios podiam percorrer até reabastecer.

Ao longo do século XX, a tecnologia da propulsão por linhas (figura 1.2) de eixo continuou a evoluir, com melhorias nas hélices, motores e sistemas de transmissão. Atualmente, essa forma de propulsão é amplamente utilizada em navios de todos os tipos, desde embarcações de pesca até grandes navios de carga e de passageiros.

Em resumo, a história da propulsão por linhas de eixo é uma narrativa de inovação e adaptação, que permitiu às embarcações superarem as limitações anteriores e se tornarem cada vez mais eficientes e versáteis em sua operação. Desde os primeiros usos com máquinas a vapor até os motores de combustão interna modernos, essa tecnologia desempenhou um papel crucial na navegação marítima e continua a ser uma parte essencial do transporte marítimo mundial.

Figura 1.2 – Sistema de propulsão por linha de eixo moderno



Fonte: Farag (2020)¹

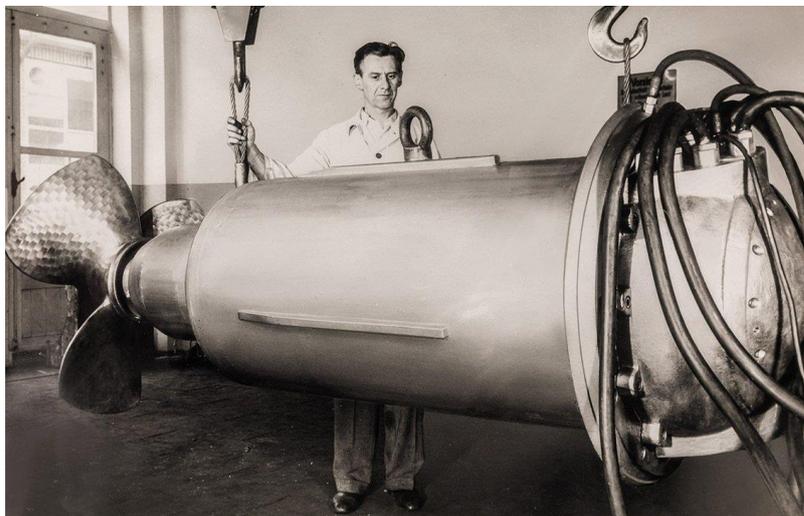
¹ Disponível em: <https://www.slideshare.net/yasserbayoumy1980/ship-propulsion-system>. Acesso em: 18 out. 2023.

Todavia a propulsão azimutal se insere nesse contexto como uma evolução da já consagrada tecnologia de transmissão baseada em linhas de eixo nos navios, porém que revolucionou o setor marítimo ao permitir uma maior manobrabilidade das embarcações.

A propulsão azimutal difere da propulsão convencional por linhas de eixo, já que as unidades azimutais, ou propulsores azimutais, são montadas de forma articulada e podem girar 360° no plano horizontal (azimute), fornecendo propulsão e governo sem a necessidade de uma hélice acoplada a um eixo fixo ao navio. A história dessa tecnologia remonta ao século XIX, mas seu uso generalizado só se tornou uma realidade no século XX.

Um propulsor azimutal nada mais é do que um arranjo de hélices marítimas acopladas a capsulas submersas, que podem ser giradas em qualquer ângulo no plano horizontal (azimute). O conceito de propulsão azimutal surgiu pela primeira vez em meados do século XIX, mas a tecnologia na época era primitiva e limitada em sua aplicação. Foi Joseph Becker quem inventou o primeiro propulsor azimutal de arranjo Z em 1950, sendo patenteado pela primeira vez pela empresa alemã Pleuger em 1955 com o nome Leme de Pleuger (figura 1.3), e servia inicialmente para aumentar a capacidade de manobra dos navios quando em baixas velocidades.

Figura 1.3 – Leme de Pleuger



Fonte: Página da empresa Pleuger Industries²

O próximo grande passo foi dado com a criação do Azipod® (figura 1.4), cujo nome foi patenteado e segue em evolução até os dias atuais, esse nome é derivado da junção de “Azi” (*Azimuth*) mais a palavra “Pod” (cápsula ou casulo em inglês), onde reside submerso um

² Disponível em: <https://www.pleugerindustries.com/en/company/history>. Acesso em: 23 out. 2023.

sistema de transmissão ou um motor elétrico que impulsiona a hélice. Eles foram desenvolvidos inicialmente na Finlândia no final da década de 1980, em uma colaboração entre a Wärtsilä, a Strömberg (posteriormente ABB) e a Finnish National Board of Navigation.

Figura 1.4 – Primeira unidade Azipod instalada em um navio



Fonte: Afrizal et al. (2016, p.23)

Mas apenas com os avanços tecnológicos no final do século XX que a propulsão azimutal se tornou viável em grande escala. O desenvolvimento de motores elétricos mais potentes e eficientes, juntamente com sistemas de controle eletrônico mais sofisticados, permitiu que os propulsores de azimutais se tornassem uma opção prática para navios comerciais.

Hoje em dia, a propulsão azimutal é amplamente utilizada em embarcações que vão desde navios de cruzeiro até rebocadores e embarcações de pesquisa. Essa tecnologia oferece uma série de vantagens, como maior manobrabilidade, redução de ruídos e a capacidade da embarcação girar em torno do próprio eixo, tornando a atracação e a navegação em espaços apertados mais fáceis.

A história da propulsão azimutal é repleta de inovação e adaptação, à medida que a tecnologia evoluiu para atender às crescentes demandas da indústria naval. Conforme as preocupações com a eficiência energética e a sustentabilidade continuam a crescer, é provável que a propulsão azimutal desempenhe um papel ainda mais significativo no futuro, ajudando a melhorar a eficiência e a segurança das embarcações em todo o mundo.

1.1 Apresentação do Problema

Ao comparar a propulsão azimutal com a propulsão convencional por linhas de eixo, verificam-se algumas similaridades e diferenças entre si, mas por se tratarem de dois sistemas propulsivos distintos, não convém realizar uma comparação direta entre ambos a fim de eleger um vencedor.

Vários fatores de projeto e operacionais precisam ser considerados, tais como a eficiência energética, a manobrabilidade, os requisitos de manutenção, dentre outros aspectos que possam distingui-los qualitativamente e, por fim subsidiar uma melhor escolha do sistema propulsivo a ser utilizado.

1.2 Justificativa e Relevância

A escolha do sistema propulsivo ideal é um dos fatores cruciais para determinar o sucesso de um projeto naval. Devido aos altos custos, tempo e esforços envolvidos na construção de um navio, é de fundamental importância que haja um estudo preliminar criterioso e embasado sobre os requisitos operacionais de cada navio, visando o melhor desempenho da sua atividade-fim, pois após o lançamento do navio ao mar, dificilmente será possível voltar atrás ou até mesmo realizar grandes correções no sistema propulsivo que fora instalado.

De forma a balizar uma tomada de decisões por parte dos projetistas, engenheiros e armadores mais assertiva, faz-se necessário que exista uma forma de analisar e comparar os sistemas de propulsão azimutal e convencional por linhas de eixo, concorrendo assim para o sucesso do projeto.

1.3 Objetivos

Este estudo visa descrever e analisar as principais características construtivas e operacionais dos sistemas de propulsão azimutal e convencional com linhas de eixo, bem como realizar uma análise comparativa entre ambos, com base em aspectos qualitativos.

1.3.1 Objetivo Geral

Servir como base teórica de conhecimento sobre a análise comparativa entre os sistemas de propulsão azimutal e convencional com linhas de eixo, a fim de subsidiar uma possível escolha entre eles.

1.3.2 Objetivos Específicos

Espera-se que esta atividade de pesquisa proporcione maior conhecimento e compreensão dos sistemas de propulsão de navios com propulsores azimutais e convencionais com linhas de eixo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A obra de Carlton (2007) abrange uma variedade de tópicos relacionados à propulsão marítima, incluindo princípios de hidrodinâmica, design de hélices, sistemas de propulsão, eficiência energética, vibração, ruído, e muitos outros tópicos relevantes. Ele fornece uma base sólida para entender os conceitos por trás do design de hélices e sistemas de propulsão em navios e embarcações.

O livro de Molland (2008) é amplamente respeitado como uma fonte valiosa de informações técnicas e práticas relacionadas à engenharia naval e assuntos marítimos. Ele aborda uma ampla gama de tópicos, desde princípios básicos de engenharia naval até tópicos avançados e tendências da indústria marítima. É considerado uma fonte confiável para informações técnicas, padrões e práticas recomendadas em engenharia naval, projeto de navios, sistemas de propulsão, estruturas marítimas dentre outros.

Em Castro (2013) são discutidos os fatores que contribuíram para o avanço tecnológico dos sistemas de propulsão azimutal em todo o mundo, no contexto da construção naval. Além disso, são abordadas as principais características, benefícios e limitações desses sistemas.

Nos estudos realizados por Tannuri et al. (2011) e posteriormente por e Yuba (2014), uma análise de desempenho é conduzida, comparando propulsores tradicionais e propulsores azimutais, destacando a superioridade dos últimos em relação ao sistema convencional.

Desai-Patil et al. (2015) conduz uma revisão sobre a propulsão azimutal, abordando os principais tipos e as subdivisões de acordo com suas características, bem como algumas vantagens e limitações.

3 METODOLOGIA

Neste estudo, foi adotada uma abordagem de pesquisa descritiva com foco qualitativo em relação aos objetivos estabelecidos. A coleta de dados foi realizada por meio de pesquisa bibliográfica e documental, com uma abordagem qualitativa.

O objetivo era estabelecer conexões entre os dados coletados para construir uma base teórica abrangente sobre a propulsão convencional com linha de eixo e a propulsão azimutal. A interpretação dos resultados obtidos permitiu alcançar tanto os objetivos gerais quanto os específicos deste estudo.

3.1 Limitações do Método

Este estudo apresenta algumas limitações importantes que devem ser consideradas ao interpretar os resultados. Em primeiro lugar, não se dispõem de dados experimentais que comprovem a acurácia das informações obtidas durante a pesquisa bibliográfica, bem como uma padronização quanto a uma categoria de navios ou modelos de propulsores tanto azimutais quanto convencionais específicos. Isso pode ter gerado uma generalização dos resultados, não abrangendo particularidades específicas que existem se fossem levados em consideração caso a caso.

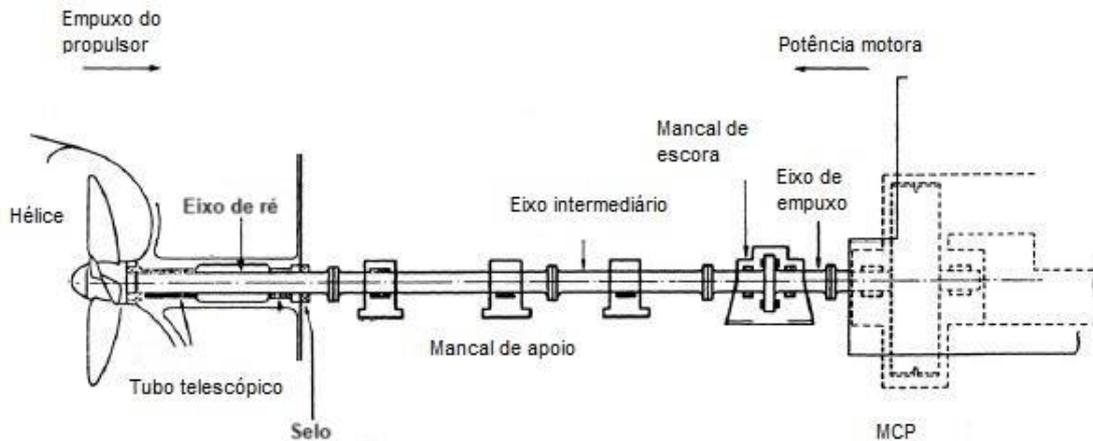
No entanto, é importante reconhecer que essas limitações podem ter afetado a amplitude e a profundidade das conclusões deste estudo. Recomenda-se que estudos futuros considerem amostras de dados reais ou simulações em programas específicos, visando conclusões mais refinadas sobre o tema.

4 DESCRIÇÃO E ANÁLISE DO CASO

4.1 Propulsão Convencional por Linhas de Eixo:

As áreas de aplicação para propulsão por linhas de eixo são diversas, sendo seu uso predominante tanto em navios comerciais quanto em embarcações militares. Em navios comerciais, como porta-contêineres ou graneleiros, a propulsão convencional por linhas de eixo fornece uma solução econômica que atende às necessidades operacionais do transporte de longa distância. Embarcações militares como fragatas e corvetas também contam com esse tipo de sistema de propulsão devido à sua eficiência e confiabilidade.

Figura 4.1 – Diagrama de linha de eixo



Fonte: Molland (2008, p.441) - Adaptado

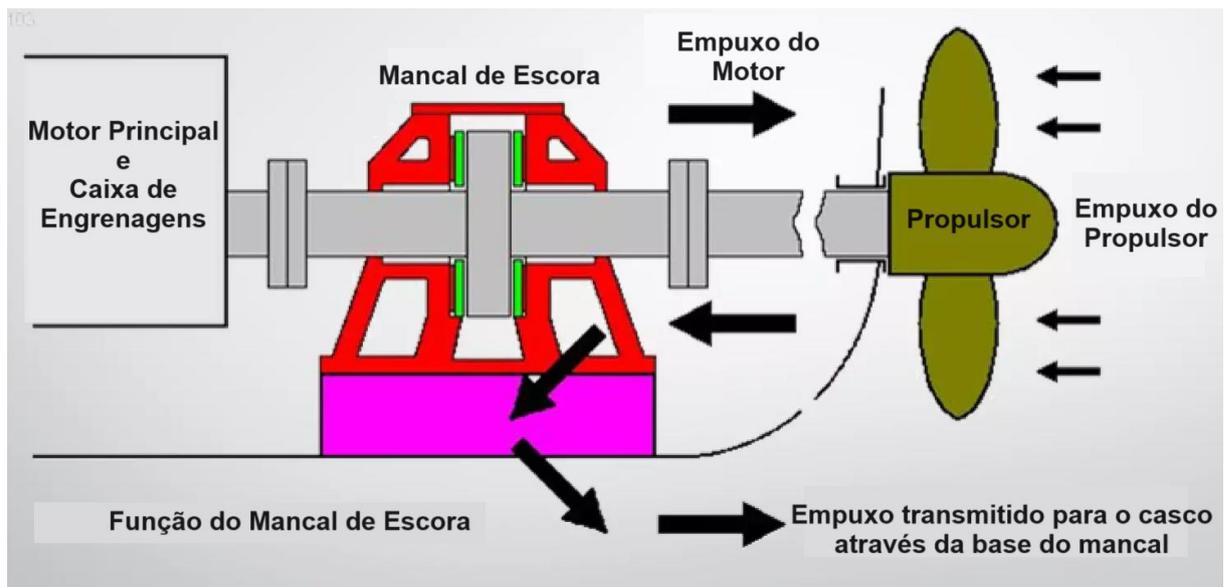
Como vemos na figura 4.1, o arranjo do sistema de propulsão por linha de eixo requer diversos acessórios que integram todo o sistema desde onde a força motriz é gerada, passando ou não por engrenagens redutoras ou inversoras, por um mancal de escora responsável por absorver a força axial gerada pelo empuxo da hélice, mancais de apoio ou sustentação, que contrapõem as forças laterais e verticais geradas pelas vibrações e da gravidade. Por exemplo, um selo que desempenha o papel fundamental de vedar a entrada de água pelas folgas necessárias entre o eixo e os mancais navio e um tubo telescópico ou pé de galinha que sustenta o eixo no trecho final até a ligação com a hélice.

A seguir, veremos detalhadamente os principais componentes que integram a propulsão por linha de eixo e as funções que estes desempenham para que o deslocamento do navio ocorra de maneira segura e eficaz.

4.1.1 Mancal de Escora

O mancal de escora (figura 4.2) é um componente mecânico responsável por transferir a carga de empuxo gerada pela hélice para a estrutura do casco do navio. Ele pode ser uma unidade autônoma ou fazer parte do Motor Principal – MCP ou MEP.

Figura 4.2 – Função do Mancal de Escora



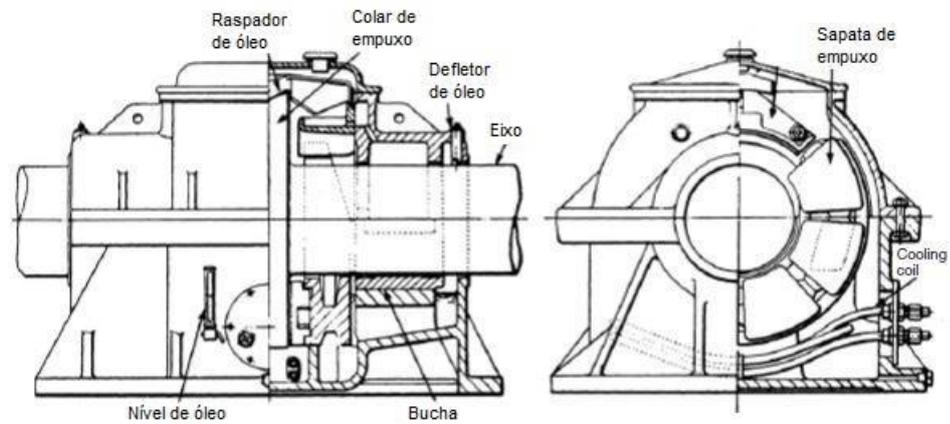
Fonte: Farag (2020)³ - Adaptado

Segundo Molland (2008), o mancal é composto por uma carcaça sólida que é montada sobre um berço estrutural projetado para cumprir sua função de suporte. A carcaça é dividida horizontalmente na região central e fixada por meio de parafusos. Os mancais de escora são equipados com sapatas, as quais são responsáveis por sustentar a carga de empuxo.

Conforme ilustrado na figura 4.3, essas sapatas se estendem por toda a circunferência do colar que suporta o eixo, direcionando assim toda a carga de empuxo para a estrutura do mancal.

³ Disponível em: <https://www.slideshare.net/yasserbayoumy1980/ship-propulsion-system>. Acesso em: 18 out. 2023.

Figura 4.3 – Mancal de Escora



Fonte: Molland (2008, p.442) - Adaptado

4.1.2 Mancal de Apoio

Também denominados mancais de sustentação (figura 4.4), os mancais de apoio possuem uma estrutura dividida em duas partes, uma superior e outra inferior.

Os mancais de apoio têm a importante função de sustentar o peso do eixo ao longo de sua extensão dentro do navio.

Figura 4.4 – Mancal de Apoio



Fonte: Página da empresa AP9 Solutions⁴

⁴ Disponível em: <https://ap9solutions.com.br/artigos/f/linhas-de-eixo-em-navios-inspe%C3%A7%C3%A3o-e-manuten%C3%A7%C3%A3o>. Acesso em: 18 out. 2023.

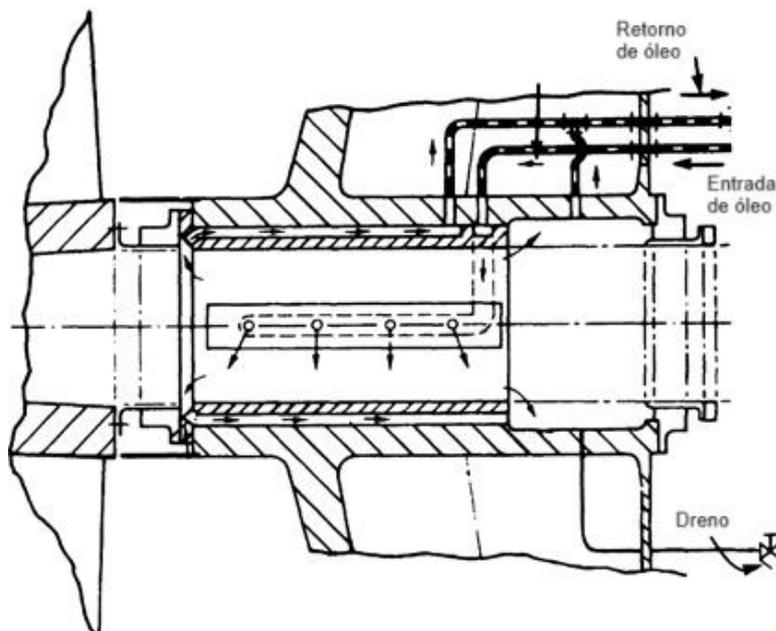
4.1.3 Tubo Telescópico

O tubo telescópico (figura 4.5) desempenha duas funções fundamentais: ele serve para sustentar o eixo e grande parte da carga da hélice, ao mesmo tempo que funciona como um elemento protetor para evitar a entrada de água na praça de máquinas.

Nas concepções mais atuais, são adotados sistemas com lubrificação à óleo ou água, equipados com buchas metálicas ou fabricadas a partir de resinas especiais. Nos sistemas lubrificados à óleo, o lubrificante é direcionado por canais internos e distribuído por sulcos ao longo do eixo, sendo seu resfriamento realizado por meio de um trocador de calor.

Adicionalmente, é necessário manter um ou dois reservatórios sobressalentes disponíveis para repor o sistema em caso de falha na bomba. É crucial manter a pressão do óleo lubrificante mais elevada do que a pressão estática da água do mar local, para assegurar que a água do mar não penetre no tubo telescópico caso haja algum problema no selo mecânico.

Figura 4.5 – Tubo telescópico lubrificado por óleo



Fonte: Molland (2008, p.444) - Adaptado

4.1.4 Linha de Eixo

A linha de eixo pode ser formada por uma ou mais seções de eixo. A seção de eixo diretamente conectada ao propulsor recebe a denominação de eixo propulsor. As demais seções da linha de eixo são denominadas de eixos intermediários, como podemos observar na figura

4.6. Esses trechos de eixo são produzidos a partir de lingotes de aço forjado que já incluem flanges integrados, sendo unidos por meio de parafusos de alta resistência.

As seções de eixos intermediários apresentam flanges em ambas as extremidades, e é possível que o diâmetro da seção aumente nas áreas próximas aos mancais.

Quanto ao eixo propulsor, este possui um flange apenas em uma de suas extremidades, onde se conecta ao eixo intermediário. Na extremidade oposta, há uma seção cônica na qual a hélice é encaixada e fixada por uma porca, de acordo com Molland (2008).

Figura 4.6 – Sessão de linha de eixo



Fonte: Página da empresa Det Norske Veritas Group (DNV)⁵

4.1.5 Hélice

A hélice consiste em um bosso (base da hélice) com várias pás de forma helicoidal, que estão uniformemente espaçadas, que giram e transferem a carga do empuxo gerado para o mancal de escora e, posteriormente, para a estrutura da embarcação.

Apesar de existirem diversos tipos de hélices propulsoras em uso na atualidade, para este trabalho foram elencadas os dois modelos principais utilizados pela indústria naval quando se utilizam linhas de eixo, sendo estas a hélice de passo fixo e a hélice de passo controlável, as quais veremos detalhadamente neste capítulo.

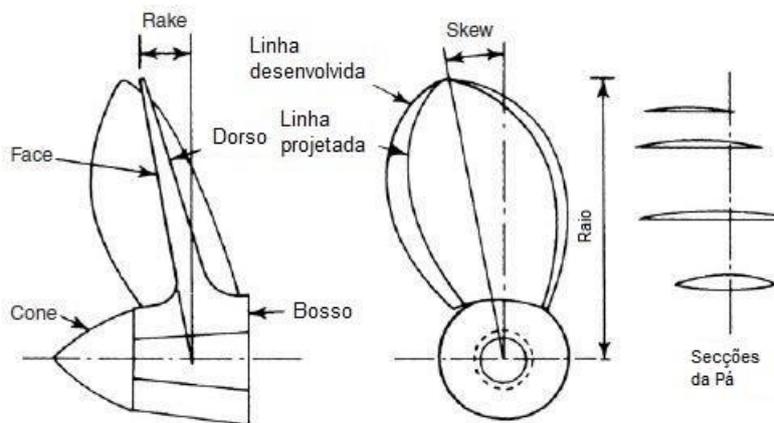
Uma hélice de passo fixo é mostrada na figura 4.7 e, embora seja descrita como fixa, o passo é variável ao longo do raio. No entanto, o passo em qualquer ponto é fixo, e para

⁵ Disponível em: <https://www.dnv.com/services/propulsion-shaft-alignment-services-4784>. Acesso em: 19 out. 2023

fins de cálculo, um valor médio é usado. Uma hélice que gira no sentido horário quando vista de trás é considerada de mão direita, e a maioria dos navios monohélice tem hélices de mão direita. Um navio bi hélice geralmente tem uma hélice de mão direita em boreste e uma hélice de mão esquerda em bombordo.

Normalmente, esses tipos de propulsores são produzidos por meio de um processo de fundição altamente controlado, empregando ligas especiais de bronze e níquel como matéria-prima.

Figura 4.7 – Hélice de passo fixo

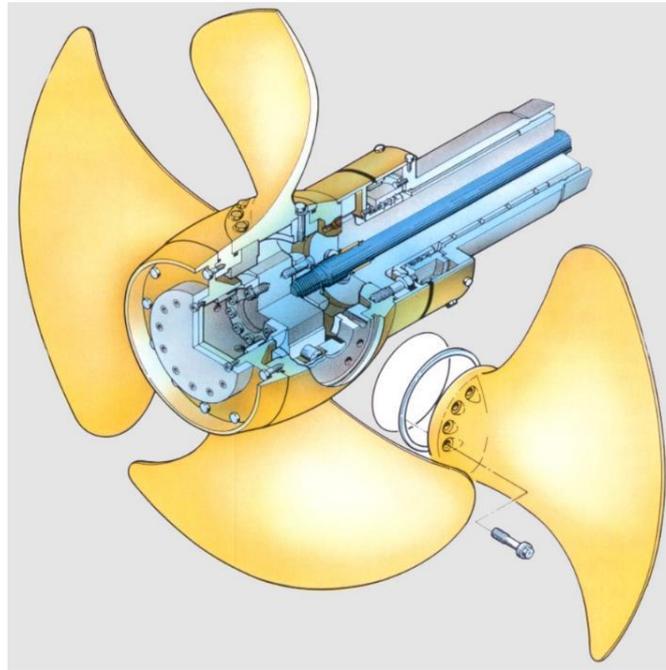


Fonte: Molland (2008, p.444) - Adaptado

Um outro tipo hélice também bastante comum e de igual importância para o entendimento deste estudo é a hélice de passo controlável. Ela é composta por um bosso com pás separadas montadas nele. Um mecanismo interno permite que as pás sejam movidas simultaneamente ao redor de um eixo na direção radial, permitindo, assim, a variação do passo. Um arranjo típico pode ser observado na figura 4.8.

O mecanismo de controle, que geralmente é hidráulico, passa internamente pelo propulsor e a operação é geralmente realizada a partir do passadiço ou CCM. Variar o passo altera o empuxo. É possível definir uma posição das pás que proporcione um passo nulo, assim, a linha de eixo pode girar continuamente sem gerar empuxo, ou seja, sem deslocar o navio. Outra possibilidade é girar as pás até ser alcançado um valor de passo que proporcione empuxo no sentido inverso, portanto, o sentido de rotação do eixo não precisa ser alterado para que seja obtido um movimento do navio para ré.

Figura 4.8 – Hélice de passo controlável



Fonte: Página da empresa MAN Energy Solutions⁶

Na tabela 4.1 a seguir, Molland (2008) compara esses dois tipos de propulsores e elenca algumas de suas características mais importantes para maior compreensão do tema:

Tabela 4.1 – Características importantes dos tipos de hélice

Tipo de propulsor	Características
Hélice de passo fixo	<ul style="list-style-type: none"> • Facilidade de fabricação; • Projetada para uma única condição (ou seja, ponto de design); • A raiz da pá determina o tamanho do bosso; • Nenhuma restrição para área da pá ou sua forma; • A velocidade de rotação varia com a potência absorvida; • Tamanho do bosso relativamente pequeno.
Hélice de passo controlável	<ul style="list-style-type: none"> • Pode acomodar várias condições de funcionamento; • Velocidade de operação do eixo constante ou variável; • Restrição na área da pá para manter a reversibilidade; • A raiz da pá é restringida para dimensões menores; • Maior complexidade mecânica; • Tamanho do bosso maior, regido por requisitos de maior torque.

⁶ Disponível em: https://www.man-es.com/docs/default-source/marine/03_experttalk-handout-slides_extracts-n-adjust_tok.pdf. Acesso em: 19 out. 23

Fonte: Molland (2008, p.287) - Adaptado

4.2 Propulsão Azimutal

As unidades de propulsão azimutal têm sido amplamente utilizadas por muitos anos e podem ter arranjos de hélices com ou sem dutos. Os sistemas de propulsão azimutal se destacam por suas unidades compactas, que são acionadas por motores a diesel ou motores diesel-elétricos.

Atualmente, a maior unidade tem uma capacidade de cerca de 27 MW (Castro, 2013), e o uso de propulsores azimutais tem sido em navios de cruzeiro, quebra-gelos, embarcações de abastecimento de plataformas ou rebocadores, onde seu potencial de manobrabilidade tem sido plenamente explorado, permitindo-lhes navegar em espaços limitados, mantendo ao mesmo tempo um controle preciso sobre os seus movimentos. No entanto, é evidente que existem diversos outros tipos de navios que poderiam se beneficiar de sua aplicação.

Em seu artigo para a RMB, Castro (2013) define:

A principal característica dos sistemas azimutais são os conjuntos compactos acionados por unidades compostas de motores diesel ou elétricos. Na configuração diesel, uma embreagem entre o motor e o propulsor transmite a potência necessária, através de um acoplamento elástico e um eixo cardã para o propulsor. Na configuração elétrica, um motor elétrico acoplado ao propulsor é alimentado por um conjunto diesel-gerador.

Apesar de existirem inúmeras variações e formatos de azimutais, a principal diferença que ainda ocorre entre eles reside no local onde o motor que aciona a hélice está instalado, podendo estar localizado no interior do casco do navio ou acoplado diretamente ao eixo da hélice. Neste último caso, tem-se apenas a opção de acionamento por motor elétrico.

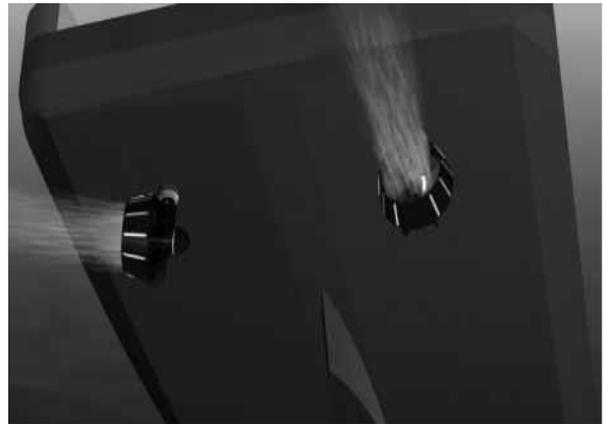
Cada um desses sistemas traz consigo significativas vantagens de manobrabilidade, sendo a principal delas a possibilidade de direcionar o empuxo para onde se desejar (figuras 4.9 e 4.10), possibilitando a realização de manobras em um espaço muito reduzido e, até mesmo, permanecer em posicionamento dinâmico (DP), manobras estas que seriam impossíveis de serem realizadas pela propulsão com linhas de eixo sem a ajuda de *bow* ou *stern thrusters*.

Figura 4.9 – Empuxo unidirecional



Fonte: Castro (2013, p.157)

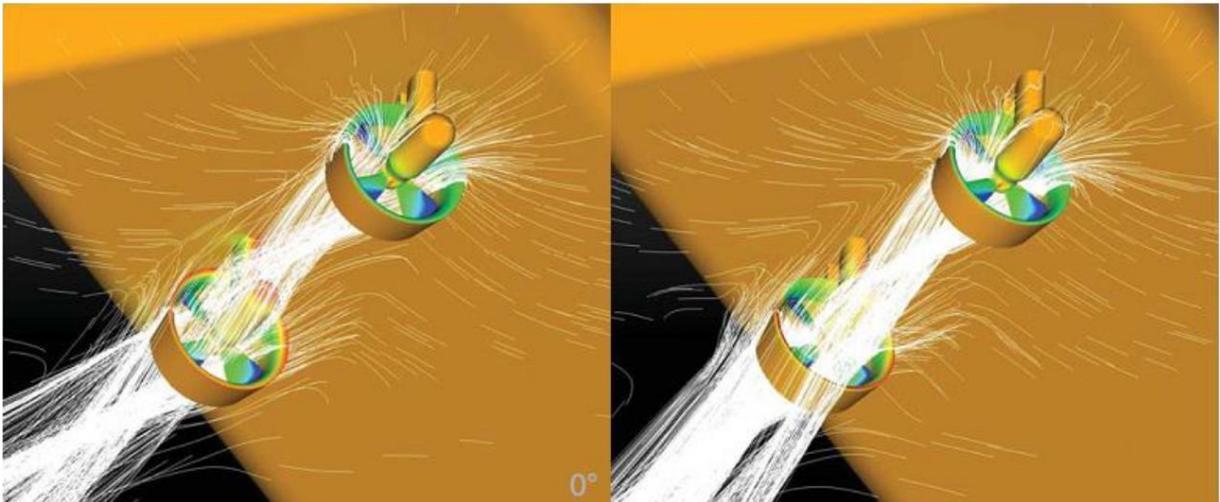
Figura 4.10 – Empuxo multidirecional



Fonte: Castro (2013, p.157)

No entanto, quando usados em combinação de duas ou mais unidades, pode haver perda de eficiência em função da distância entre eles e em função do ângulo relativo entre eles (Yuba, 2014), sendo necessário tomar cuidado para evitar a incidência de ângulos de azimute nos quais as unidades de propulsão possam interferir mutuamente, como mostra a figura 4.11. Se isso ocorrer, grandes forças e momentos oscilantes podem ser induzidos nos sistemas dos eixos, e vibrações significativas podem ser observadas (Molland, 2008).

Figura 4.11 – Interferência entre propulsores azimutais



Fonte: Yuba (2014, p.31)

4.2.1 Propulsor Azimutal

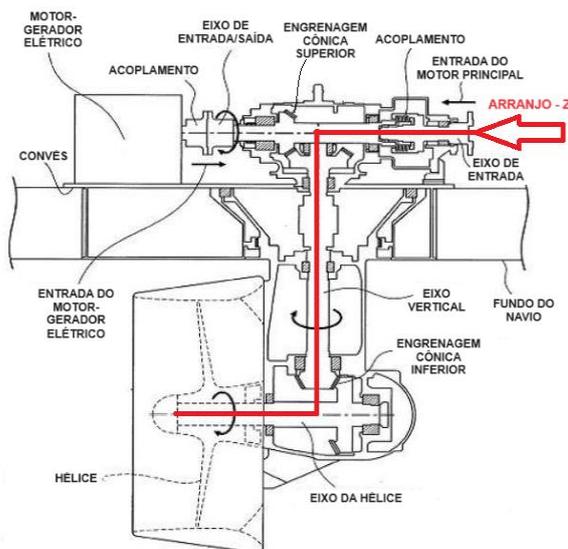
Localizados na parte traseira dos navios, os propulsores azimutais têm a capacidade de lidar com altas potências e permitem movimentos de rotação completos de 360 graus sobre seu eixo vertical, graças a unidades de acionamento, podendo também possuir hélice de passo

fixo ou passo controlável. Outra característica que os diferenciam entre si é o tipo de transmissão mecânica da força motriz para o eixo da hélice, que pode ser do tipo Z ou L, como vemos nas figuras 4.12 e 4.13.

A configuração em L consiste em um motor elétrico colocado verticalmente acima do eixo da hélice, onde um eixo de entrada vertical é acoplado a um eixo de saída horizontal. A transmissão de potência entre o eixo do motor e o eixo da hélice é obtida usando um arranjo de engrenagem cônica.

Já o arranjo em Z o acionamento é realizado horizontalmente no convés do navio, porém são utilizados três eixos: um eixo de entrada horizontal acoplado ao motor é conectado a um eixo intermediário vertical e, por fim, é conectado a um eixo de saída horizontal ligado à hélice com a ajuda de dois ângulos retos através de engrenagens cônicas e formando assim um formato de Z.

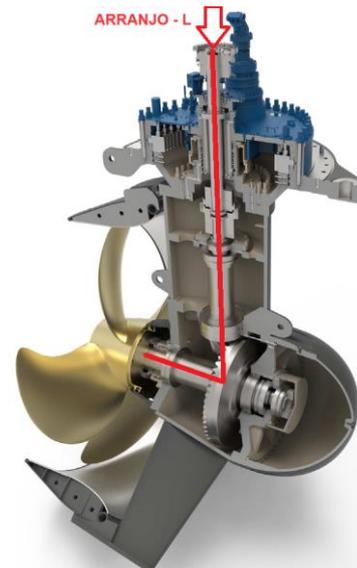
Figura 4.12 – Arranjo em Z



Fonte: Desai-Patil et al. (2015, p.22) -

Adaptado

Figura 4.13 – Arranjo em L

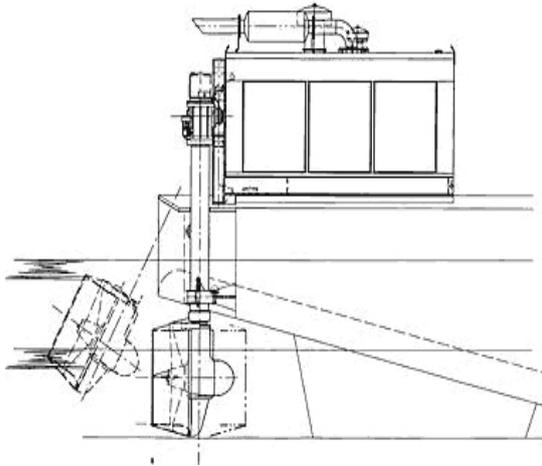


Fonte: Manngård et al. (2022, p.3) -

Adaptado

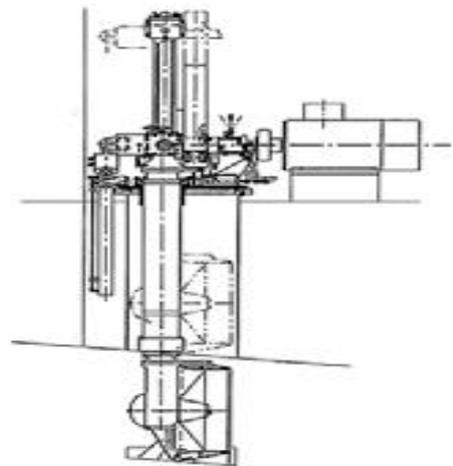
Alguns desses propulsores podem também realizar movimentos na direção vertical, o que permite ajustar o sistema de propulsão de acordo com diferentes condições de calado ou operação, conforme ilustrado nas figuras 4.14 e 4.15. A presença de um tubulão ao redor da hélice em alguns desses sistemas é essencial para obter uma tração estática maior, sendo um recurso comum em rebocadores e empurradores.

Figura 4.14 – Instalação rebatível no convés



Fonte: Castro (2013, p.157)

Figura 4.15 – Instalação retrátil

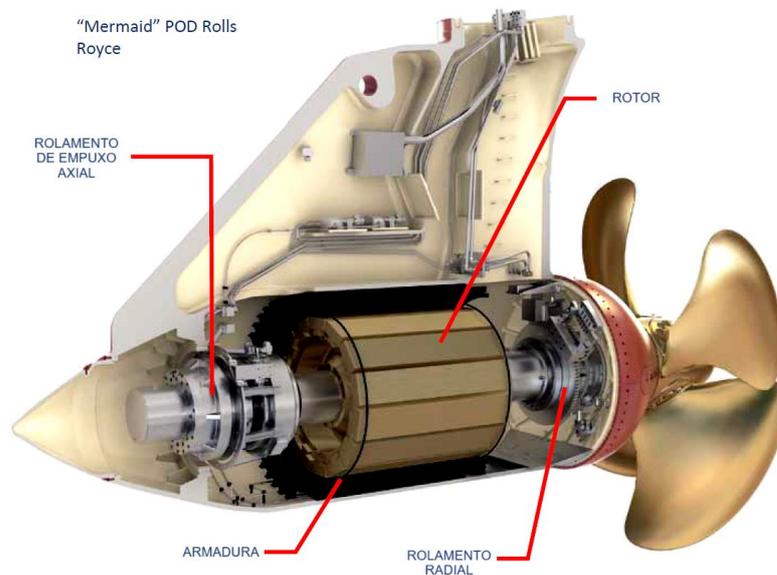


Fonte: Castro (2013, p.157)

4.2.1 Propulsor tipo *Pod*

O sistema de acionamento de um propulsor azimutal do tipo *pod* é mostrado na figura 4.16 e, normalmente, consiste em um motor elétrico acoplado diretamente ao eixo da hélice, que é suportado por dois sistemas de rolamentos principais: sendo um rolamento para suportar os esforços radiais, mais próximo da hélice, enquanto o outro é um rolamento cônico na extremidade oposta da linha do eixo, para suportar as forças axiais de empuxo.

Figura 4.16 – Visão interna de um “Mermaid” POD® Rolls Royce

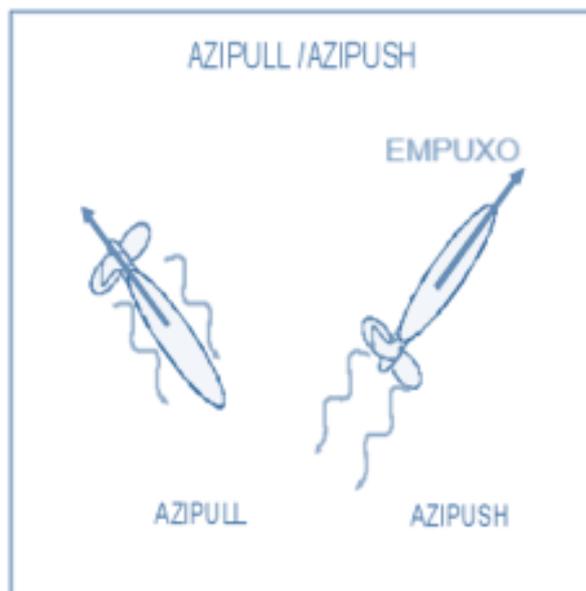


Fonte: Canepa et al. (s.d., p.3)

No entanto, existem variantes desse arranjo. As hélices associadas por esses propulsores podem ser do tipo passo fixo ou controlável e podem ser divididos em dois tipos segundo Desai-Patil et al. (2015): o *Azipush*, onde a hélice é instalada na direção da popa do navio, assim como na propulsão convencional. E o sistema *Azipull*, que conta com a hélice instalada na direção da proa do navio e o restante do *pod* atrás dela (figura 4.17).

Com os avanços tecnológicos nesse tipo de propulsores, observa-se uma grande dominância nos dias atuais de modelos do tipo *Azipull* (figura 4.18).

Figura 4.17 – *Azipull* e *Azipush*



Fonte: Woodward (s.d., p.4)

Figura 4.18 – Propulsor *Azipull*®



Fonte: Página da empresa Kongsberg⁷

⁷ Disponível em: <https://www.kongsberg.com/maritime/products/propulsors-and-propulsion-systems/thrusters/azipull/>. Acesso em: 22 out. 23.

4.3 Análise Comparativa entre a Propulsão Convencional e a Propulsão Azimutal

Neste item serão apresentados e discutidos os principais fatos que observados ao longo dessa pesquisa e que nos permitem ter uma visão mais analítica e qualitativa entre a propulsão convencional por linhas de eixo e a propulsão azimutal nos dias atuais.

Apesar de suas diferenças, os sistemas de propulsão de linha de eixo e azimutal compartilham algumas características comuns. Em primeiro lugar, ambos os sistemas utilizam hélices para gerar empuxo e impulsionar a embarcação.

Outra semelhança é a necessidade de motores à combustão, sejam os MCP que acionam diretamente os eixos das hélices na propulsão convencional e nos arranjos em Z dos propulsores azimutais, sejam os MCA que estão presentes na propulsão híbrida – onde MEP são utilizados dentro do navio na propulsão convencional por linhas de eixo e na propulsão azimutal nos arranjos em L ou dentro dos *pods*, permitindo maior liberdade de projeto para organizar os equipamentos a bordo, sem ter que se preocupar com linhas de eixo e grandes motores e periféricos dispostos no meio do navio.

Porém, na parte estrutural de ré e de governo percebem-se diferenças, a principal delas é a presença do leme e todo seu maquinário necessário para operação com propulsão convencional. A propulsão azimutal dispensa a necessidade desses equipamentos, visto que o simples direcionamento do fluxo do propulsor é responsável pelo governo do navio, e este deve ser concebido com distinções bem específicas no projeto para acomodar todo peso e geometria do propulsor azimutal naquela parte de ré do casco e as adequações estruturais necessárias para que se mantenha uma distribuição correta do peso a bordo e na hidrodinâmica envolvida com a instalação de um grande apêndice submerso, visando sempre manter a eficiência de todo o sistema.

A seguir, serão expostas algumas características positivas e negativas sobre cada sistema propulsivo, de comum acordo por alguns autores e que puderam ser depreendidas após um entendimento mais profundo sobre o funcionamento de cada um deles.

4.3.1 Propulsão Convencional com linhas de eixo

A propulsão convencional geralmente apresenta maior eficiência em altas velocidades, isso tem relação com o arrasto, já que na propulsão com linhas de eixo, o eixo e respectivos apêndices são bastante simplificados em relação aos propulsores azimutais, oferecendo menor resistência ao avanço e maior eficiência em velocidades mais altas.

A instalação de sistemas de propulsão convencionais tende a ser mais econômica em comparação com sistemas azimutais, pelo fato de ser uma tecnologia amplamente difundida, requer mão de obra e equipamentos menos especializados e mais simples, fazendo com que o preço seja menor em relação à propulsão azimutal.

As unidades de propulsão convencionais são, em geral, mais fáceis de manter e reparar, reduzindo os custos de manutenção no curto prazo, pelo mesmo motivo citado acima e por ter uma cadeia logística de suprimentos ainda muito maior que a azimutal.

4.3.2 Propulsão Azimutal

A opção pelo sistema de propulsão do tipo AziPod possibilita hoje a melhor relação entre energia elétrica produzida e o empuxo necessário para impulsionar os navios e as embarcações (Castro, 2013).

Em Tannuri (2011) e Yuba (2014) nos é apresentada a principal vantagem que a propulsão azimutal oferece em comparação com o sistema convencional, a capacidade de girar os propulsores em qualquer direção no plano horizontal, permitindo uma manobrabilidade superior, facilitando a atracação, manobras em espaços confinados e a possibilidade de utilização deste sistema para DP.

Castro (2013) também cita as seguintes vantagens da propulsão azimutal sobre a propulsão convencional: requer menor distância de parada para a embarcação, menor período de docagem (inexistência das operações de retirada de linha de eixo e alinhamento) e planta propulsora totalmente concebida por um mesmo fabricante.

A propulsão azimutal é mais eficiente em baixas velocidades, proporcionando uma economia de combustível para navio que não precisam dispendir grandes velocidade ou que permanecem grande parte do seu tempo parado, em DP, ou em baixas velocidades, rebocadores por exemplo.

O custo com manutenção no longo prazo tem se mostrado mais favorável para a propulsão azimutal, visto que esta requer menor quantidade de peças e periféricos assim como necessitam de menos intervenções para se manterem operando.

A disposição das hélices em unidades individuais reduz as vibrações e o ruído a bordo, reduzindo a poluição sonora a bordo e hidro acústica, tornando-a adequada para embarcações que exigem um ambiente silencioso, como é o caso dos cruzeiros que em sua grande maioria já utilizam este sistema.

Uma das principais desvantagens é o custo inicial mais elevado. Os sistemas de propulsão azimutal são geralmente mais caros para se adquirir e instalar, principalmente devido à complexidade do equipamento e à necessidade de pessoal especializado.

Outra desvantagem é a redução da eficiência do propulsor azimutal em velocidades mais altas. Embora a propulsão azimutal prospere em baixas velocidades e operações dinâmicas, ela se torna menos eficiente à medida que a velocidade da embarcação aumenta. Esta limitação é devida às forças de arrasto e resistência adicionais causadas pelos propulsores completamente expostos que, devido ao seu tamanho, se tornam grandes apêndices, realizando uma força contrária ao avanço considerável em altas velocidades.

Por fim, vale mencionar outras desvantagens observadas por Castro (2013): maior peso do conjunto propulsivo; grande número de componentes eletrônicos importados; limitação da potência produzida pelo motor (atualmente, a máxima potência disponível não ultrapassa 27MW⁸; vulnerabilidade da planta propulsora exposta fora do navio; montante do empuxo transmitido ao navio, em elevadas velocidades (≥ 30 nós), concentra-se em área relativamente pequena do casco, acarretando um momento fletor considerável e exigindo maior reforço estrutural na ligação com casco e, por conseguinte, maior peso concentrado na popa para ser compensado em distribuição de peso ao longo do navio.

5 CONCLUSÃO

A propulsão convencional por linha de eixo se destaca em termos de eficiência, pois fornece uma conexão mecânica direta entre o motor e a hélice, resultando em perdas mínimas de energia durante a transmissão de potência, tornando-a mais eficiente em geral do que a Propulsão Azimutal.

A propulsão azimutal oferece manobrabilidade superior devido à rotação do pod de 360 graus, o que permite aos navios equipados com este sistema maior agilidade mesmo em espaços restritos, como portos ou vias navegáveis estreitas.

Outro fator crítico são os níveis de ruído: a propulsão por linha de eixo tende a gerar mais vibrações e ruído em comparação com a propulsão azimutal devido aos múltiplos componentes mecânicos envolvidos – os próprios eixos, as caixas de engrenagens, mancais e vedações, por exemplo. Enquanto que a propulsão azimutal se beneficia do baixo ruído gerado pelos motores elétricos, reduzindo a poluição sonora a bordo e hidro acústica que vai para a

⁸ Válido apenas para os propulsores tipo *AziPod*.

água.

Os requisitos de manutenção variam entre os dois sistemas de propulsão. A propulsão de linha de eixo envolve a manutenção de vários componentes mecânicos, como caixas de engrenagens e eixos, que requerem inspeções e serviços regulares. Por outro lado, os sistemas de propulsão azimutal possuem menos peças mecânicas, reduzindo a complexidade de manutenção, devido à maioria dos componentes serem elétricos e eletrônicos.

Trazendo esta análise para a aplicação em meios militares, não seria tão proveitoso o emprego dos sistemas azimutais em navios que desenvolvem grandes velocidades – como fragatas, corvetas e navios patrulha – tendo em vista a perda de eficiência hidrodinâmica quando em velocidades elevadas e a desvantagem tática proporcionada pela maior vulnerabilidade da planta propulsora, que se encontra mais exposta a ataques inimigos e propensa a maiores danos.

Por outro lado, ainda no âmbito da Marinha do Brasil, observa-se uma grande oportunidade de utilização da propulsão azimutal em navios hidro oceanográficos e de apoio portuário (rebocadores), levando-se em consideração os requisitos operacionais destes meios serem de maior manobrabilidade e eficiência em baixas velocidades desempenhadas durante as atividades de pesquisa e manobras restritas, onde a propulsão azimutal é, sem dúvidas, uma excelente alternativa para emprego em futuros projetos ou aquisições dessas classes de navios.

Logo abaixo na tabela 5.1 pode-se observar um resumo comparativo entre os dois sistemas propulsivos analisados até o momento, utilizando como critério as características mais importantes para compreensão do assunto e ajudar em uma possível tomada de decisão entre qual tipo de propulsão escolher.

Tabela 5.1 – Tabela comparativa

Critério	Propulsão Azimutal	Propulsão Convencional
Manobrabilidade	Excelente	Inferior
Eficiência em baixas velocidades	Maior	Menor
Eficiência em altas velocidades	Menor	Maior
Custo inicial	Maior	Menor
Custo de manutenção no longo prazo	Menor	Maior
Ruído e Vibração	Reduzido	Maior

5.1 Considerações Finais

Em um mundo repleto de inovações tecnológicas é necessário sempre agir com cautela, às vezes muito entusiasmo e desejo de querer sempre o mais novo pode não ser a melhor opção em determinadas circunstâncias, assim como se prender ao passado só porque confia cegamente em algo pode impedir seu avanço e até mesmo ser superado por seus adversários.

A grande chave para resolver essa questão está no conhecimento, quem detém o conhecimento estará sempre um passo a frente de seus pares. E na indústria naval não é diferente, quem conhece seus navios e seus equipamentos, com certeza saberá tomar a melhor decisão na hora de escolher qual sistema propulsivo é o mais eficiente para cada atividade-fim. Esse fator é determinante quando o assunto trata de economia de custos, visto que os demais objetivos para qual um navio é concebido, sejam eles financeiros ou militares, são norteados majoritariamente pela relação Custo x Retorno.

Sabendo disso, torna-se necessário um profundo estudo da engenharia por trás de cada projeto naval para o correto entendimento dos fenômenos envolvidos em cada tipo de propulsão, possibilitando um dimensionamento correto dos requisitos operacionais de um navio e, conseqüentemente, uma escolha mais assertiva do sistema propulsivo.

E não adianta defender apenas um sistema propulsivo em detrimento do outro sem os conhecer profundamente. Como foi exposto neste trabalho ambos os sistemas possuem vantagens e desvantagens, cabendo ao responsável pela escolha uma análise minuciosa, visto que é consenso que não existe um sistema melhor que o outro, mas sim diferentes.

A escolha entre a propulsão convencional e a azimutal depende dos requisitos específicos de operação e sua aplicação final. A compreensão dos pontos fortes e fracos de cada sistema permite que os engenheiros, projetistas e arquitetos navais envolvidos, tomem decisões informadas, selecionem soluções adequadas com base nas expectativas de desempenho operacional, resultando em projetos de navios eficientes e eficazes e que atendam aos objetivos desejados pelos armadores e operadores dessas embarcações.

5.2 Sugestões para Futuros Trabalhos

Para trabalhos futuros poderia ser explorada a questão do consumo de combustível em navios do mesmo modelo, porém onde uns utilizam propulsão convencional e outros a propulsão azimutal, de forma a haver uma comparação direta sobre a eficiência energética de cada sistema.

Outra sugestão seria a aplicabilidade da propulsão azimutal em meios militares, visando obter uma análise mais precisa de onde a propulsão azimutal seria a mais indicada para realização de missões em cada classe de navio militar.

REFERÊNCIAS

Carlton, John. S. **Marine Propellers and Propulsion – 2nd ed.** Inglaterra: Elsevier, 2007.

MOLLAND, Anthony F. **The maritime engineering reference book a guide to ship design, construction and operation.** Inglaterra: Elsevier, 2008.

CASTRO, Luiz F. T. de. **Sistemas de Propulsão Azimutal – Eficiência e Segurança.** In: Revista Marítima Brasileira, Rio de Janeiro, v. 133 n. 10/12, p.153-160, out./dez 2013.

DESAI-PATIL, V.; AYARE, A.; MAHAJAN, B.; BADE, S.. **A Review of Azimuth Thruster.** In: SSRG International Journal of Mechanical Engineering (SSRG – IJME) – Volume 2 Issue 10. p.21-23, out 2015.

TANNURI, E. A.; ARACENA, J.G.N.; MADUREIRA, R. M. L.; OSHIRO, A.T.; YUBA, D. G. T.. **Análise comparativa da manobrabilidade de empurradores com propulsão azimutal ou convencional.** In: 7 Seminário de Transporte e Desenvolvimento Hidroviário Interior SOBENA HIDROVIÁRIO 2011, 2011, Porto Alegre. Anais do 7 Seminário de Transporte e Desenvolvimento Hidroviário Interior SOBENA HIDROVIÁRIO 2011, 2011.

YUBA, Douglas G. T. **Análise de sistemas de propulsão e manobra alternativos para aumento da manobrabilidade de comboios fluviais.** São Paulo, 2014. 106 p.

FARAG, Yasser. **Marine Engineering Knowledge UE231.** 2020. 117 slides.

CANEPA, M.; GENNARO, A.; GENNARO, G.. **POD Propulsion – Where is the Problem?** Internacional Union of Marine Insurance (IUMI). s.l., s.d. 7 p.

MANNGÅRD, M.; KOENE, I.; LUND, W.; HAIKONEN, S.; FAGERHOLM, F. A.; WILCZEK, M.; MNICH, K.; KESKI-RAHKONEN, J.; VIITALA, R.; BJÖRKQVIST, J.; A, TOIVONEN, H. T.. **Torque estimation in marine propulsion systems.** In: Mechanical Systems and Signal Processing 172 (2022) 108969. Elsevier. 2022.

WOODWARD, Michael D. **Intuitive operation and pilot training when using marine azimuthing control devices AZIPILOT**. Newcastle University - School of Marine Science and Technology. Inglaterra, s.d. 7 p.

COSTA, Charles. **Estudo sobre o comportamento dinâmico do sistema de propulsão de uma embarcação**. Santa Catarina, 2017. 81 p.

AFRIZAL, E.; KOTO, J.; WAHID, M. A.; SIOW, C. L. **Review on Double Acting Tanker Ship in Ice Mode**. In: Journal of Ocean, Mechanical and Aerospace - Science and Engineering-, Vol.38. p.20-29. dec 2016.